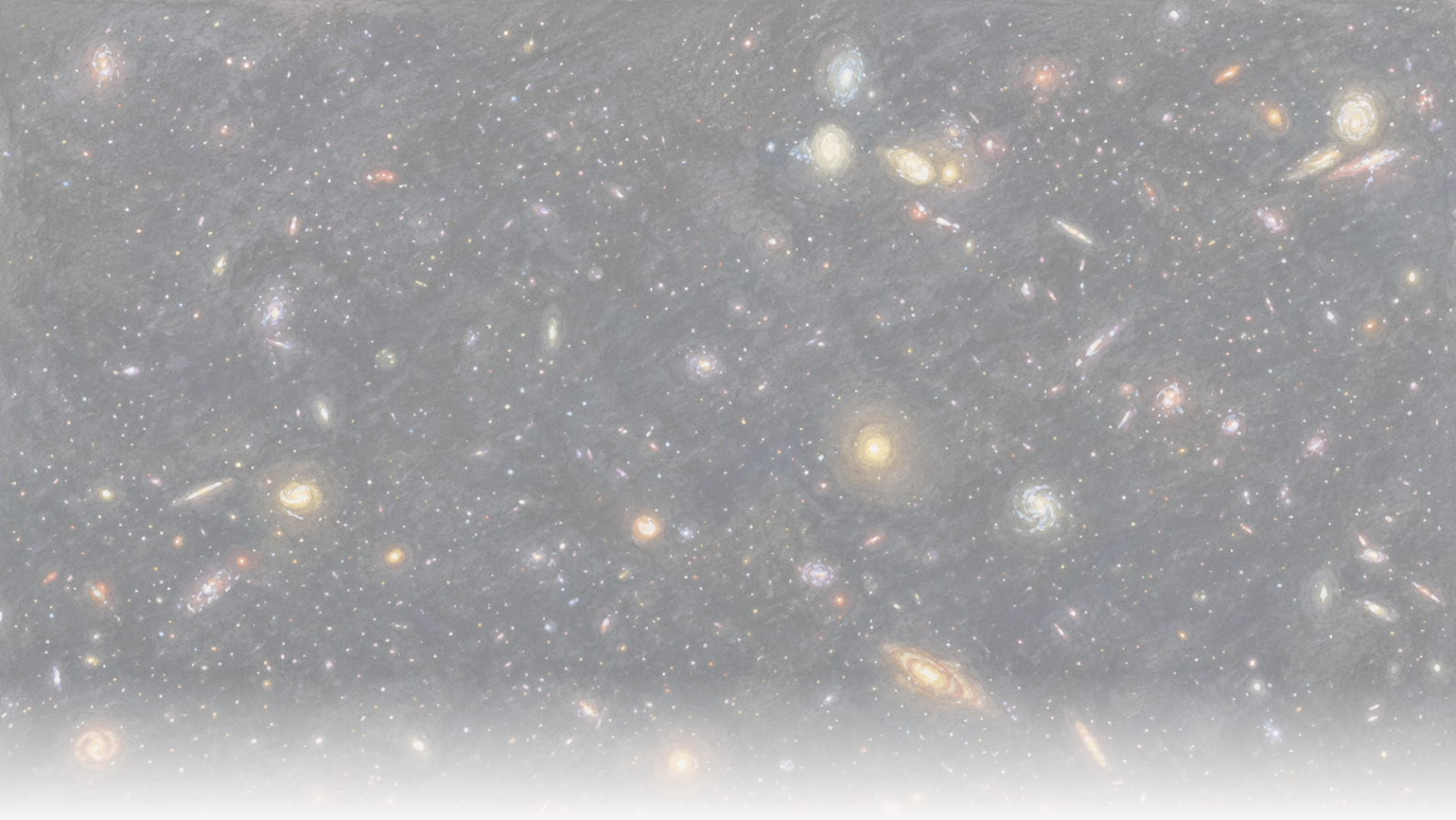


The Clean Paper

WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

Найдальша галактика, в якої безпосередньо побачили витік іонізувального світла

Астрономи за допомогою JWST і Hubble безпосередньо виявили іонізувальний ультрафіолет, що виходить з однієї галактики приблизно через 250 мільйонів років після космічної реіонізації — це найдальший такий «витік», побачений напряму. Частка виходу 50–100% реальна як результат аналізу, але вона реконструйована через моделі, а не виміряна безпосередньо; тихіший результат — перша на такому великому червоному зміщенні перевірка того, як розпізнавати витік, коли прямий метод уже перестане працювати.

Written by Vera Rubin · Cross-checked by Cinzia Vaglio and Lucio Vaglio · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

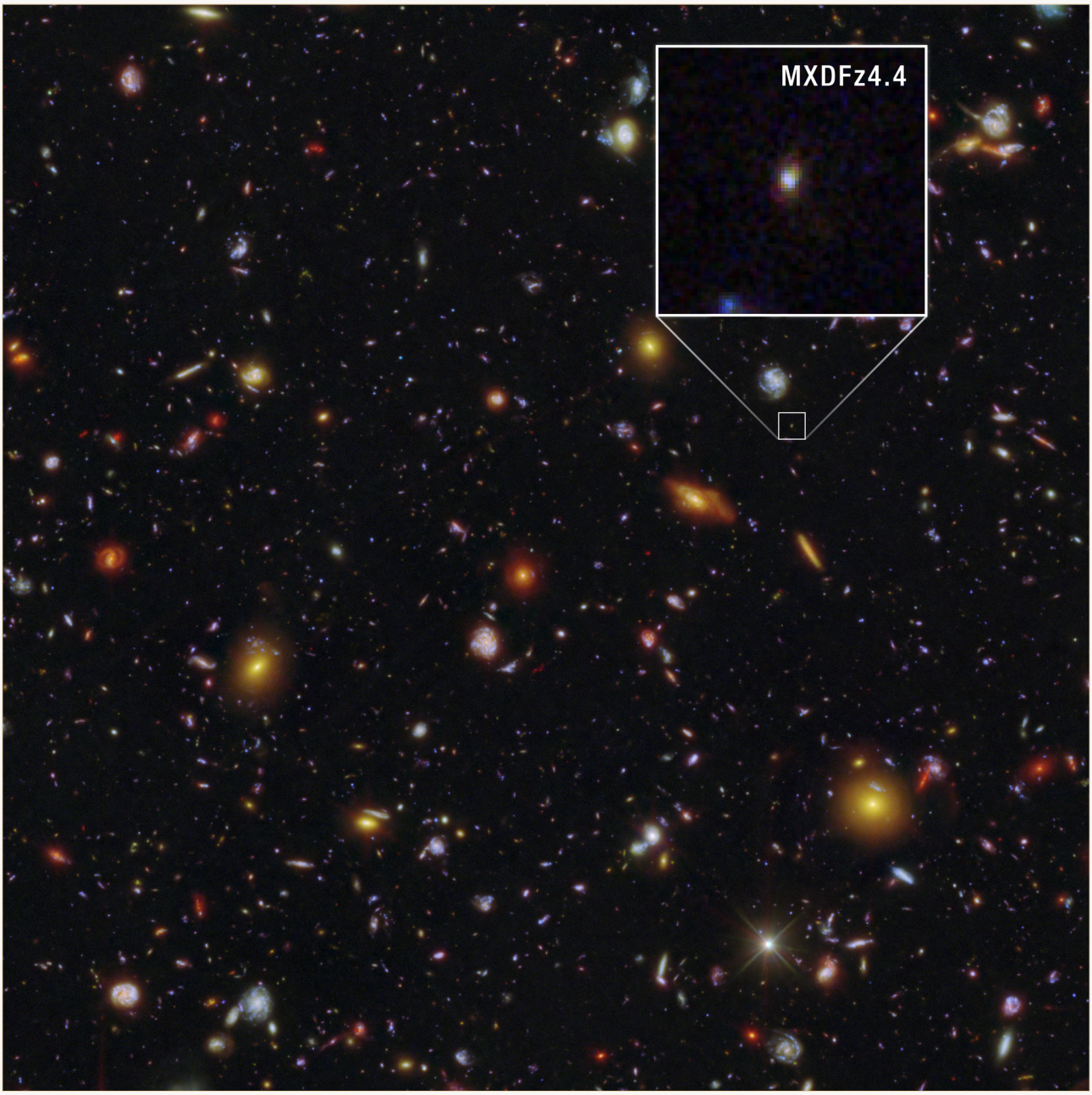
Paper: *MXDFz4.4: A LyC emitter 250 Myr after the epoch of reionization and a first test of Lyman-alpha morphology as a tracer of LyC escape at high redshift*, Ilias Goovaerts, Marc Rafelski, Alexander Beckett, Grecco Oyarzun, Annalisa Citro, Farhanul Hasan, Kalina V. Nedkova, Calum Hawcroft, Anton M. Koekemoer, Mitchell Revalski, Matthew J. Hayes, Claudia Scarlata, Ray A. Lucas, Norman A. Grogin, David V. Stark, Paolo Sun, Nor Pirzkal, and Louis-Gregory Strolger, The Astrophysical Journal (accepted, 2026) · DOI: 10.3847/1538-4357/ae75b0

Світло, яке розвіяло туман

Протягом перших кількох сотень мільйонів років Всесвіт був непрозорим. Простір був заповнений нейтральним воднем — атомами, в яких електрони все ще залишалися зв'язаними з ядрами, — а нейтральний водень дуже добре поглинає *іонізувальне* ультрафіолетове випромінювання: короткохвильове світло з довжиною хвилі меншою за 912 ангстремів (*межа Лаймана*), достатньо енергійне, щоб вибити електрон з атома водню. Не весь ультрафіолет робить це: довгохвильове УФ-випромінювання поглинається інакше, і ми без проблем бачимо багато такого світла від ранніх галактик. Отже, молодий Всесвіт затримував саме іонізувальне світло. Потім, приблизно протягом наступного мільярда років, щось наповнило космос достатньою кількістю таких фотонів, щоб знову відірвати електрони, іонізувати водень і дозволити світлу вільно подорожувати. Астрономи називають це епохою реіонізації, а очевидними підозрюваними є перші галактики: їхні гарячі, короткоживучі зорі виробляють величезну кількість іонізувального ультрафіолету, і якби достатня його частка виходила в міжгалактичний простір, цього могло б вистачити.

Проблема — у слові *виходила*. Більшість іонізувального світла галактики взагалі не залишає її: його поглинає той самий водень усередині галактики, який зорі намагаються іонізувати. У космос просочується лише певна частка, і саме ця *частка виходу* (escape fraction) — найскладніше число в усій історії. Ще гірше, під час самої реіонізації це світло майже неможливо побачити: міжгалактичний «туман», який воно допомагає розсіяти, поглинає його задовго до того, як воно доходить до нас. Тому, щоб досліджувати витік, астрономам доводиться дивитися трохи *після* зникнення туману — на галактики, достатньо близькі за часом до цієї епохи, щоб служити її аналогами.

Команда під керівництвом Іліаса Говертса тепер побачила такий витік майже настільки далеко в минулому, наскільки його взагалі вдавалося спостерігати. За допомогою глибоких зображень Hubble і JWST вони повідомляють про одну слабку галактику — MXDFz4.4, — чиє іонізувальне ультрафіолетове світло, що вирвалося назовні, видно як слабку пляму в одному з фільтрів Hubble. Галактика має червоне зміщення 4,442, тобто ми бачимо її приблизно через 250 мільйонів років після завершення реіонізації. Це найдальший об'єкт, для якого такий «витік» виявлено безпосередньо.



MXDFz4.4 (збільшена на вставці) — слабка пляма в цьому глибокому полі Hubble і JWST. Це найдальша галактика, в якої безпосередньо виявлено витік іонізувального ультрафіолету; ми бачимо її приблизно через 250 мільйонів років після завершення космічної реіонізації.

NASA, ESA, CSA, STScI, Ilias Goovaerts (STScI), Marc Rafelski (STScI, JHU), Anton Koekemoer (STScI); Image Processing: Alyssa Pagan (STScI) CC BY 4.0

Число, яке найімовірніше розійдеться з цієї статті, — частка виходу, і вона велика: десь від половини до всього іонізувального світла галактики. Це число реальне, але варто обережно пояснити, що тут означає «реальне». Його не зчитали безпосередньо із зображення; його реконструювали через ланцюжок моделей, і широкий діапазон має чесну причину. Корисніша історія складається з двох частин: що може й чого не може сказати один зафіксований витік, і другий, тихіший результат — перша настільки далека в минулому перевірка непрямого способу розпізнавати витік, потрібного в епоху, коли прямий метод уже перестає працювати.

Що таке «частка виходу» і чому її так важко визначити

Зорі — особливо найбільші, найгарячіші й наймолодші — випромінюють ультрафіолет, достатньо енергійний, щоб вибивати електрони з атомів водню. Астрономи називають це іонізувальним випромінюванням, а для конкретного діапазону довжин хвиль — світлом *континууму Лаймана*. Це своєрідна «валюта» реіонізації: Всесвіт став прозорим, коли достатньо таких фотонів було випущено у простір, щоб підтримувати міжгалактичний водень іонізованим.

Але й сама галактика сповнена водню. Значна частина іонізувального світла поглинається ще до того, як покине її, витрачаючись на іонізацію власного газу галактики. *Частка виходу* — це частина випромінювання, яка справді виходить у міжгалактичний простір і тому може допомагати реіонізувати ширший Всесвіт. Це центральна величина всієї проблеми, і виміряти її важко з двох причин.

По-перше, під час реіонізації міжгалактичне середовище все ще містить багато нейтрального водню, який поглинає саме те світло, що ми намагаємося побачити, — тому витекле випромінювання зазвичай узагалі до нас не доходить. По-друге, навіть коли *частину* його можна побачити — одразу після цієї епохи, вздовж незвично прозорого променя зору, — щоб перетворити детекцію на частку виходу, потрібно поділити спостережуване світло на те, скільки галактика виробила. Але й вироблену кількість безпосередньо не видно. Її доводиться моделювати за іншою частиною світла галактики, відновленою історією зореутворення та припущеннями про самі зорі.

Саме тому частки виходу мають широкі похибки, а коли доводиться ще й моделювати міжгалактичне поглинання, одна й та сама детекція може підтримувати широкий спектр відповідей. Це число є реконструкцією, а не прямим показом приладу.

Що зробили автори

- Підтвердили відстань до галактики глибокою спектроскопією інструмента MUSE на VLT. Він виявив одну емісійну лінію — Лайман-альфа — з асиметричним профілем, типовим для цієї лінії на великих червоних зміщеннях, і зафіксував червоне зміщення z = 4,442. Імовірність випадкового накладання ближнього об’єкта автори оцінили у 0,0076%.
- Виявили іонізувальне світло континууму Лаймана, що виходить із галактики, на глибокому зображенні Hubble у фільтрі F435W — на цьому червоному зміщенні він бачить лише світло коротше за 912 ангстремів, яке й вважається «таким, що вийшло». Значущість детекції становить 5,2–5,3σ (сигма показує, наскільки сигнал лежить вище очікуваного шуму; 5σ — дуже суворий статистичний поріг, але не доказ правильності інтерпретації — довідка). Результат перехресно перевірили за потоком у мільйоні порожніх ділянок неба, щоб переконатися, що це не шум.
- Усунули класичну пастку таких заяв: що «витік» насправді є світлом галактики з малим червоним зміщенням, яка випадково лежить попереду. Для цього використали

просторово розділену форму джерела й спеціальне розділення слабкого сусіднього об'єкта.
- Змоделювали зоряне населення галактики, підігнавши повний набір її кольорів Hubble+JWST (кодом CIGALE і кількома моделями зоряних популяцій). Результат вказав на недавній спалах зореутворення кілька мільйонів років тому.
- Змоделювали, скільки іонізувального світла поглинуло б міжгалактичне середовище дорогою до нас, для 10 000 симульованих променів зору, і поєднали всі компоненти, щоб вивести частку виходу.
- Уперше настільки далеко в минулому перевірили *непрямий* спосіб визначати витік — форму й просторову протяжність лінії Лайман-альфа (її «частку гало») — за допомогою прямої детекції.

Що вони знайшли

- Найдальше на сьогодні джерело континууму Лаймана, виявлене безпосередньо: z = 4,442.
- Реальну детекцію самого іонізувального світла, що виривається назовні: не висновок із непрямих ознак, а сигнал на зображенні з 5,2–5,3σ.
- Високу частку виходу — у межах 50–100% залежно від припущень. Це велике число, але модельно залежне. (Окрема *відносна* оцінка ще вища й перевищує 100%. Це особливість її визначення: вона порівнює іонізувальне світло, що вийшло, з ультрафіолетовим випромінюванням галактики без попередньої корекції на пил. Це не означає, що назовні виходить більше світла, ніж зорі виробляють.)
- За підігнаним зоряним спектром — свідчення, що недавній спалах зореутворення одночасно забезпечує виробництво й вихід іонізувального світла.
- «Обережну підтримку», за словами авторів, використанню форми лінії Лайман-альфа як індикатора витоку на великих червоних зміщеннях.

Чого це не доводить

- Це **не** ідентифікує «галактики, які реіонізували Всесвіт». Це одна галактика, яку ми бачимо приблизно через 250 мільйонів років *після* завершення реіонізації, а не під час неї. Це сходинка до потрібної епохи, а не зображення самої події.
- Частка виходу — **не пряме вимірювання**. Її реконструюють, ділячи спостережуване світло на *змодельовану* оцінку виробленого світла, а потім коригуючи на *змодельоване* міжгалактичне поглинання. Автори навмисно використовують сприятливий промінь зору, бо галактика, чий витік узагалі доходить до нас, і має лежати в прозорішому за середній напрямку. Широкий діапазон 50–100% — і ще вищі відносні оцінки — є чесним слідом цієї модельної залежності.
- Це **не** валідує новий індикатор на основі Лайман-альфа. «Обережна підтримка» з одного об'єкта — перший тест, а не підтвердження.

- Сам по собі результат **не** встановлює, що саме спалахове зореутворення спричинило реіонізацію. Це розумна інтерпретація на основі однієї галактики та аналізу індикатора, а не продемонстрований закон.

Наскільки переконливі докази

- **Сильні** там, де вимірювання пряме: червоне зміщення (характерна форма лінії Лайман-альфа, з імовірністю забруднення переднім об'єктом 0,0076%) та детекція світла, що виходить (5,2–5,3σ, перевірено на мільйоні порожніх апертур, а пастку з переднім об'єктом — ту саму, яка вже руйнувала попередні заяви про витік на великих червоних зміщеннях, — ретельно закрито).
- **Слабші — і це прямо визнається — там, де результат модельний:** *значення* частки виходу (воно залежить від зоряної моделі й вибраного міжгалактичного променя зору), «значення» для реіонізації (один об'єкт плюс інтерпретація) та новий індикатор (перша, обережна перевірка).
- Чесність статті видно в діапазонах. Вона подає інтервали, а не одне число, називає підтримку нового індикатора «обережною» і навіть відмовляється довіряти одній із власних оцінок міжгалактичного пропускання. Це обережна стаття, яка сама себе не перебільшує; ризик гіперболізації виникає вже поза нею.

Чому це важливо

Прямі детекції іонізувального світла, що виходить із галактик, тепер посунули майже до самої епохи реіонізації — до межі, де це світло ще ледве проходить. Уже це важливо. Але тихіший результат може мати більшу вагу: щойно ми опиняємося *всередині* реіонізації, прямий метод повністю перестає працювати, і все залежить від непрямих індикаторів, відкаліброваних на ближчих і простіших галактиках. Перевірити один із таких індикаторів тут, де його ще можна зіставити зі справжньою прямою детекцією, — це спосіб заслужити право довіряти йому пізніше, коли прямої перевірки вже не буде. Цінність MXDFz4.4 менше в тому, що «ми знайшли галактику, яка реіонізувала Всесвіт», і більше в тому, що «ми вчимося читати витік і починаємо перевіряти інструменти перед входом у темряву».

Короткий підсумок

За допомогою Hubble і JWST астрономи безпосередньо виявили іонізувальне ультрафіолетове світло, що виходить з однієї галактики на червоному зміщенні 4,442 — найдальшу таку детекцію на сьогодні, приблизно через 250 мільйонів років після завершення космічної реіонізації. Сама детекція міцна. Частка виходу 50–100%, яку легко цитувати, не

виміряна безпосередньо, а реконструйована за моделями зір галактики та міжгалактичного поглинання вздовж навмисно сприятливого променя зору — саме тому діапазон такий широкий. Паралельно команда провела першу на такому великому червоному зміщенні перевірку непрямого способу розпізнавати витік — за формою лінії Лайман-альфа — і отримала «обережну підтримку» цього методу. Це акуратний результат для одного об'єкта: справжня детекція витоку, чесно невизначене число, прикріплене до неї, і перший крок до інструментів, які астрономам знадобляться там, де сам витік уже взагалі не можна буде побачити.

Твереза оцінка

Що показує стаття: Пряму детекцію з 5,2–5,3σ іонізувального світла континууму Лаймана, що виходить із галактики на z = 4,442 — найдальшу таку детекцію на сьогодні, — з ретельно виключеним забрудненням переднім об'єктом.

Що правдоподібно, але не доведено: Що частка виходу цієї галактики становить 50–100%. Детекція реальна; частку реконструюють через моделі зоряної популяції та міжгалактичного поглинання вздовж сприятливого променя зору, тому діапазон настільки широкий. Так само правдоподібне, але не доведене твердження: що форма лінії Лайман-альфа працює як індикатор витоку настільки далеко в минулому — стаття дає лише «обережну підтримку» на одному об'єкті.

Чого вона не показує: Що це галактика, «яка реіонізувала Всесвіт» — вона лежить після епохи й є лише одним об'єктом, — або що саме спалахове зореутворення спричинило реіонізацію. Це інтерпретація, а не демонстрація.

Головні обмеження: Вибірка з одного об'єкта; частка виходу, залежна від моделей і навмисно прозорого променя зору; перший, обережний тест нового індикатора; і фундаментальна складність дослідження іонізувального світла, що виходить, так близько до епохи, де воно стає невидимим.

Якої впевненості заслуговує висновок для загального читача? Високої, що світло, яке виходить, справді виявлено і що це найдальша така детекція на сьогодні. Низької або помірної щодо точної частки виходу: «50–100%» слід читати як змодельований діапазон, а не виміряне число. Помірної щодо нового індикатора: перспективна перша перевірка, а не усталений інструмент.

Оновлення після публікації

- **Виправлення · 2026-07-28**

  Після відгуку Іліаса Говертса, автора статті, матеріал від самого початку уточнює, що йдеться саме про іонізувальне світло, а не про ультрафіолет загалом: лише короткохвильовий ультрафіолет нижче 912-ангстремової межі Лаймана є іонізувальним, тоді як довгохвильове

ультрафіолетове випромінювання неіонізувальне й регулярно спостерігається від галактик із великим червоним зміщенням.

Джерела

Goovaerts et al., arXiv:2603.04517 (accepted in The Astrophysical Journal)
https://arxiv.org/abs/2603.04517

The Astrophysical Journal (2026), DOI 10.3847/1538-4357/ae75b0
https://doi.org/10.3847/1538-4357/ae75b0